

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平11-330585

(43)公開日 平成11年(1999)11月30日

(51)Int.Cl.⁶

識別記号

F I

H 0 1 L 43/08

H 0 1 L 43/08

Z

G 1 1 C 11/15

G 1 1 C 11/15

H 0 1 L 43/00

H 0 1 L 43/00

審査請求 未請求 請求項の数27 O L (全 20 頁)

(21)出願番号

特願平10-130711

(22)出願日

平成10年(1998)5月13日

(71)出願人 000002185

ソニー株式会社

東京都品川区北品川6丁目7番35号

(72)発明者 岩崎 洋

東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニ

ー株式会社内

(72)発明者 別所 和宏

東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニ

ー株式会社内

(74)代理人 弁理士 小池 晃 (外2名)

(54)【発明の名称】 磁化制御方法、磁気機能素子、情報記録方法、情報記録素子及び可変抵抗素子

(57)【要約】

【課題】 磁気メモリ等を実現するのに好適な磁化制御方法として、微細化に伴うクロストークの発生や保磁力の低下といった問題を回避することが可能な磁化制御方法を提供する。また、そのような磁化制御方法を採用した各種素子を提供する。

【解決手段】 導電性を有する材料を含む導電体層が磁性層の間に位置するように、導電体層と複数の磁性層とが積層されてなる積層体を構成する。そして、上記積層体の導電体層に電流を流すことで、磁性層間の磁氣的結合状態を変化させて、磁性層の磁化方向を制御する。

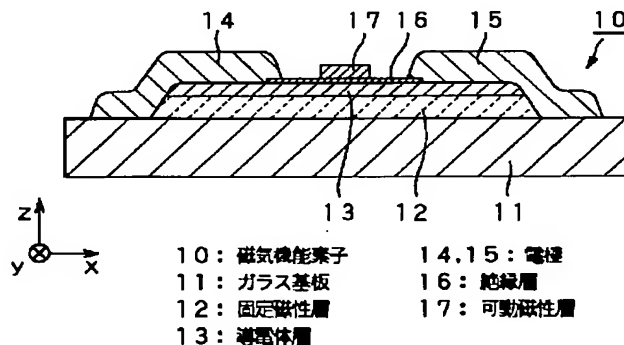


図4のX₁-X₂線における断面図

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 導電性を有する材料を含む導電体層が磁性層の間に位置するように、導電体層と複数の磁性層とが積層されてなる積層体を構成し、

上記積層体の導電体層に電流を流すことで、磁性層間の磁氣的結合状態を変化させて、磁性層の磁化方向を制御することを特徴とする磁化制御方法。

【請求項 2】 上記導電体層は、単相で磁気秩序を示す物質と非磁性の物質との両方を含む複合材料からなることを特徴とする請求項 1 記載の磁化制御方法。

【請求項 3】 上記導電体層は、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とを交互に形成した積層薄膜又は組成変調膜からなることを特徴とする請求項 1 記載の磁化制御方法。

【請求項 4】 上記導電体層は、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とが 3 次的に混じり合った構造とされていることを特徴とする請求項 1 記載の磁化制御方法。

【請求項 5】 上記導電体層の上層及び下層に、当該導電体層よりも電気抵抗の高い材料からなる層を配することを特徴とする請求項 1 記載の磁化制御方法。

【請求項 6】 導電性を有する材料を含む導電体層が磁性層の間に位置するように、導電体層と複数の磁性層とが積層されてなる積層体を備え、

上記積層体の導電体層に電流を流すことで、磁性層間の磁氣的結合状態を変化させて、磁性層の磁化方向を制御することを特徴とする磁気機能素子。

【請求項 7】 磁気光学効果を用いて、磁性層の磁化状態に対応した出力を行うことを特徴とする請求項 6 記載の磁気機能素子。

【請求項 8】 上記導電体層は、単相で磁気秩序を示す物質と非磁性の物質との両方を含む複合材料からなることを特徴とする請求項 6 記載の磁気機能素子。

【請求項 9】 上記導電体層は、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とを交互に形成した積層薄膜又は組成変調膜からなることを特徴とする請求項 6 記載の磁気機能素子。

【請求項 10】 上記導電体層は、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とが 3 次的に混じり合った構造とされていることを特徴とする請求項 6 記載の磁気機能素子。

【請求項 11】 上記導電体層の上層及び下層に、当該導電体層よりも電気抵抗の高い材料からなる層を備えていることを特徴とする請求項 6 記載の磁気機能素子。

【請求項 12】 導電性を有する材料を含む導電体層が磁性層の間に位置するように、導電体層と複数の磁性層とが積層されてなる積層体を構成し、

上記積層体の導電体層に電流を流すことで、磁性層間の磁氣的結合状態を変化させて、磁性層の磁化方向を制御し、

磁性層の磁化の向きにより、二値もしくはそれ以上の多

値記録を行うことを特徴とする情報記録方法。

【請求項 13】 上記導電体層は、単相で磁気秩序を示す物質と非磁性の物質との両方を含む複合材料からなることを特徴とする請求項 12 記載の情報記録方法。

【請求項 14】 上記導電体層は、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とを交互に形成した積層薄膜又は組成変調膜からなることを特徴とする請求項 12 記載の情報記録方法。

【請求項 15】 上記導電体層は、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とが 3 次的に混じり合った構造とされていることを特徴とする請求項 12 記載の情報記録方法。

【請求項 16】 上記導電体層の上層及び下層に、当該導電体層よりも電気抵抗の高い材料からなる層を配することを特徴とする請求項 12 記載の情報記録方法。

【請求項 17】 導電性を有する材料を含む導電体層が磁性層の間に位置するように、導電体層と複数の磁性層とが積層されてなる積層体を備え、

上記積層体の導電体層に電流を流すことで、磁性層間の磁氣的結合状態を変化させて、磁性層の磁化方向を制御し、

磁性層の磁化の向きにより、二値もしくはそれ以上の多値記録を行うことを特徴とする情報記録素子。

【請求項 18】 磁気光学効果を利用して磁性層の磁化の向きが検出されることで、記録された情報が読み出されることを特徴とする請求項 17 記載の情報記録素子。

【請求項 19】 上記導電体層は、単相で磁気秩序を示す物質と非磁性の物質との両方を含む複合材料からなることを特徴とする請求項 17 記載の情報記録素子。

【請求項 20】 上記導電体層は、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とを交互に形成した積層薄膜又は組成変調膜からなることを特徴とする請求項 17 記載の情報記録素子。

【請求項 21】 上記導電体層は、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とが 3 次的に混じり合った構造とされていることを特徴とする請求項 17 記載の情報記録素子。

【請求項 22】 上記導電体層の上層及び下層に、当該導電体層よりも電気抵抗の高い材料からなる層を備えていることを特徴とする請求項 17 記載の情報記録素子。

【請求項 23】 第 1 の磁性層と、導電体層と、第 2 の磁性層と、非磁性層と、第 3 の磁性層とが積層されてなる積層体を備え、

上記積層体の導電体層に電流を流すことで、第 1 の磁性層と第 2 の磁性層との間の磁氣的結合状態を変化させて、第 2 の磁性層の磁化方向を制御するとともに、第 2 の磁性層の磁化方向を制御することで、第 2 の磁性層、非磁性層及び第 3 の磁性層に至る経路の電気抵抗を制御することを特徴とする可変抵抗素子。

【請求項 24】 上記導電体層は、単相で磁気秩序を示

3

す物質と非磁性の物質との両方を含む複合材料からなることを特徴とする請求項23記載の可変抵抗素子。

【請求項25】 上記導電体層は、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とを交互に形成した積層薄膜又は組成変調膜からなることを特徴とする請求項23記載の可変抵抗素子。

【請求項26】 上記導電体層は、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とが3次元的に混じり合った構造とされていることを特徴とする請求項23記載の可変抵抗素子。

【請求項27】 上記導電体層の上層及び下層に、当該導電体層よりも電気抵抗の高い材料からなる層を備えていることを特徴とする請求項23記載の可変抵抗素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、磁性体の磁化制御方法に関する。また、本発明は、磁性体を利用した磁気機能素子に関する。また、本発明は、磁性体の磁化を制御することにより情報を記録する情報記録方法及び情報記録素子に関する。また、本発明は、磁性体の磁化を制御することにより電気抵抗を制御する可変抵抗素子に関する。

【0002】

【従来の技術】磁性体を利用した素子は、半導体デバイスに比較して、二つの点で魅力を持っている。第1に、素子の要素として導電性を有する金属を利用できるので、高いキャリア密度及び低い抵抗値を実現できるという点である。そのため、磁性体を利用した素子は、微細化及び高集積化に適すると期待される。第2に、磁性体をもつ磁化方向の双安定性を不揮発性メモリに利用できる可能性があるという点である。すなわち、磁性体をもつ磁化方向の双安定性を利用すれば、回路の電源を切っても記憶した情報が失われない固体不揮発性メモリを実現できるものと期待される。

【0003】なお、回路の電源を切っても記憶した情報が失われない固体不揮発性メモリは、究極の省電力メモリとして、様々な分野で実用化が期待されている。具体的には例えば、固体不揮発性メモリは、非活動時に電力消費がないので、携帯電子情報機器等におけるバッテリーの容量及び重量を減らすキーテクノロジーとして期待されている。また、固体不揮発性メモリは、衛星メディアビジネスの立ち上がりを背景に、太陽電池が使用不可となる地球の影の中での衛星の活動を支えるものとしても需要が高い。

【0004】そして、磁性体を利用した素子には、

(1) 不揮発性を有すること、(2) 繰り返しによる劣化がないこと、(3) 高速書き込みが可能であること、(4) 小型化及び高密度化に適していること、(5) 放射線耐性に優れていること、などの利点がある。以下、これらの利点について説明する。

4

【0005】(1) 不揮発性を有する

磁気テープや磁気ディスク等の磁気記録媒体がそうであるように、磁性体自体がもつ磁化方向の双安定性(bistability)のおかげで、磁化方向として書き込まれた情報は、駆動力がなくなってもそのまま保たれる。

【0006】(2) 繰り返しによる劣化がない

磁性体と同様に双安定性を示す強誘電体を用いたメモリ(F-RAM: Ferroelectric Random Access Memory)も、固体不揮発性メモリの候補として提案されている。F-RAMでは、自発誘電分極を反転させることにより、メモリ状態を書き換えることとなる。しかし、メモリ状態の書き換えに対応する自発誘電分極の反転には、結晶格子中でのイオン移動を伴うので、書き換えを百万回以上にわたって繰り返すと、結晶欠陥が発達してしまう。そのため、F-RAMでは、材料の疲労により超えられない素子寿命が問題となっている。一方、磁性体の磁化反転は、イオン移動などを伴わないので、磁性体を利用した素子では、材料の疲労に制限されることなく、ほぼ無限に書き換えを繰り返すことができる。

10 【0007】(3) 高速書き込みが可能

磁性体の磁化反転の速さは、1 ns程度以下と非常に速い。したがって、この速いスイッチング速度を活かすことで、高速書き込みが可能となる。

【0008】(4) 小型化及び高密度化に適している

磁性合金は、組成や組織を選択することで、磁気特性を様々なに変化させることができる。したがって、磁性体を利用した素子では、設計の自由度が極めて高くなる。そして、磁性体を利用した素子では、例えば、導電性を有する磁性合金を利用することも可能である。導電性を有する磁性合金を利用した場合は、半導体を用いた場合に比べて、素子中の電流密度を高くとれるので、半導体素子よりも更に小型化及び高密度化を進めることが可能となる。

【0009】なお、このような特徴を利用した素子として、例えば、日本応用磁気学会誌Vol. 19, 684(1995)に記載されているように、スピントランジスタが提案されている。スピントランジスタでは、図18に示すように、磁性体Eによってエミッタを構成し、磁性体Cによってコレクタを構成し、非磁性体Bによってベースを構成する。このような構成のスピントランジスタでは、磁性体C、Eから非磁性体Bにしみ出す偏極密度によって、磁性体C、Eの磁化方向に依存する出力電圧が生じる。なお、図18に示すスピントランジスタでは、出力電圧が磁性体C、Eの磁化方向に依存する構造を作っているが、それらの磁化方向の変更は、磁化用電流線100に磁化用電流パルスPを供給し、当該磁化用電流パルスPが作る磁界を、磁性体C、Eに印加することにより行うようにしている。

【0010】(5) 放射線耐性に優れている

50 D-RAM (Dynamic Random Access Memory) のように

電気容量への充電によってメモリ状態をつくっている素子は、電離放射線が素子中を通過すると放電が生じ、メモリ情報を失ってしまう。これに対して、磁性体の磁化方向は、電離放射線によって乱されるようなことがないので、磁性体を利用した素子は、放射線耐性に優れている。したがって、磁性体を利用した素子は、通信衛星などのように、高い放射線耐性が要求される用途において特に有用である。実際に、磁性体を利用したメモリの一つである磁気バブルメモリは、通信衛星に搭載されるメモリとして既に使用されており多くの実績がある。

【0011】

【発明が解決しようとする課題】以上のように、磁性体を利用した素子には様々な利点があるが、一方でいくつかの問題点もある。以下、磁性体を利用した素子における問題点について、磁性体を利用したメモリであるM-RAM (Magnetic Random Access Memory) を例に挙げて説明する。なお、以下に説明する問題はいずれも、書き込みのために記憶担体に磁界を印加していることに起因している。

【0012】 (1) クロストークが生じる

従来のM-RAMにおいて、メモリへの書き込みは磁界印加によっているが、磁界は遠距離力なので、記憶担体

$$H = (\pi i D^2 / 4) / (2 \pi L) = i D / 8 \quad \dots (2)$$

そして、許容電流密度を $i = 10^7 [\text{A}/\text{cm}^2] = 10^{11} [\text{A}/\text{m}^2]$ とし、 $D' [\mu\text{m}] = D [\text{m}] \times 10^6$ とすると、記録担体に印加される磁界強度 $H [\text{A}/\text{m}]$ は、下記式 (3) で表さ

$$H = 12500 \times D' [\text{A}/\text{m}] = 156 \times D' [\text{Oe}] \quad \dots (3)$$

このように、微細化によって記憶担体である磁性体を導線の中心により近く配置することで記録担体が磁界発生源に近くなる効果を勘案したとしても、利用できる最大磁界は、概ねデザインルールに比例して減少することになる。

【0018】一方、記憶担体の保磁力は、外部から印加される磁界で磁化反転が達成されるように設計されなくてはならない。そのため、微細化に伴い記録担体に印加できる磁界が小さくなると、それに伴い、記録担体の保磁力を小さくする必要がある。すなわち、M-RAMでは、微細化に伴い、記録担体の保磁力を小さくする必要がある。しかしながら、記録担体の保磁力があまりに小さくなると、信頼性が低下してしまう。このことは、特に周囲から外乱磁界を受ける環境で使用されることが多い携帯電子機器用メモリとしては、大きな問題である。

【0019】ところで、上述した問題点は、記憶担体の磁化を反転させるために外部から磁界を印加することによって起因しており、M-RAMの場合に限定されるものではない。例えば、図18に示したようなスピントランジスタにおいても、同様な問題がある。スピントランジスタでは、出力が素子構成要素の磁化方向に依存して変化するという機能を実現しているが、入力操作 (すなわち「出力決定にあずかる磁性体要素の磁化方向を変える手

が高密度に集積された場合には、選択された記録担体に隣接する領域にも無視できない影響が及んでしまい、クロストークが生じる。これを防ぐために、例えば「Z.G. Wang, et al., IEEE Trans Magn., Mag33, 4498 (1997)」において、磁界遮蔽構造をもつメモリセルの設計例も報告されているが、構造が複雑になるという欠点がある。

【0013】 (2) 微細化に伴い保磁力が低下する

従来のM-RAMにおいて、書き込み磁界の発生は電流によっているが、導線の運びうる電流密度 $i [\text{A}/\text{m}^2]$ には、材料で決まる限界がある。したがって、デザインルールが微細化し、導線径が細くなるに従って、利用できる電流の上限値は減少する。

【0014】ここで、導線の直径を $D [\text{m}]$ とすると、この導線の中心から距離 $L [\text{m}]$ だけ離れた位置での磁界強度 $H [\text{A}/\text{m}]$ は、下記式 (1) で表される。

【0015】

$$H = (\pi i D^2 / 4) / (2 \pi L) \quad \dots (1)$$

導線と記憶担体のそれぞれの中心間の距離は、 D よりも大幅に小さくなるようなことはないので、 $L = D$ とおくと、記録担体に印加される磁界強度 $H [\text{A}/\text{m}]$ は、下記式 (2) で表される。

【0016】

れる。

【0017】

段」) は、M-RAMの場合と同様に、近傍の電流からの磁界印加によっている。したがって、M-RAMについて指摘した上記二つの問題は、スピントランジスタにおいても同様に存在する。

【0020】本発明は、以上のような従来の実情に鑑みて提案されたものであり、微細化に伴うクロストークの発生や保磁力の低下といった問題を回避することが可能な磁化制御方法を提供することを目的としている。また、本発明は、そのような磁化制御方法を採用した磁気機能素子、情報記録方法、情報記録素子及び可変抵抗素子を提供することも目的としている。

【0021】

【課題を解決するための手段】本発明に係る磁化制御方法では、導電性を有する材料を含む導電体層が磁性層の間に位置するように導電体層と複数の磁性層とが積層されてなる積層体を構成する。そして、本発明に係る磁化制御方法では、上記積層体の導電体層に電流を流すことで、磁性層間の磁氣的結合状態を変化させて、磁性層の磁化方向を制御する。

【0022】なお、上記磁化制御方法において、上記導電体層には、例えば、単相で磁気秩序を示す物質と非磁性の物質との両方を含む複合材料を用いても良いし、また、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とを交互に形

成した積層薄膜又は組成変調膜を用いても良いし、また、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とが3次元的に混じり合った構造のものを用いても良い。

【0023】また、上記磁化制御方法では、上記導電体層の上層及び下層に、当該導電体層よりも電気抵抗の高い材料からなる層を配するようにしても良い。上記導電体層の上層及び下層に当該導電体層よりも電気抵抗の高い材料からなる層を配した場合には、上記積層体に電流を流したときに、当該電流が導電体層に集中することとなる。

【0024】また、本発明に係る磁気機能素子は、導電性を有する材料を含む導電体層が磁性層の間に位置するように導電体層と複数の磁性層とが積層されてなる積層体を備える。そして、上記積層体の導電体層に電流を流すことで、磁性層間の磁氣的結合状態を変化させて、磁性層の磁化方向を制御する。この磁気機能素子では、例えば、磁気光学的カー効果やファラデー効果等の磁気光学効果を用いて、磁性層の磁化状態に対応した出力を行う。

【0025】なお、上記磁気機能素子において、上記導電体層は、例えば、単相で磁気秩序を示す物質と非磁性の物質との両方を含む複合材料からなるものであっても良いし、また、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とを交互に形成した積層薄膜又は組成変調膜からなるものであっても良いし、また、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とが3次元的に混じり合った構造のものであっても良い。

【0026】また、上記磁気機能素子は、上記導電体層の上層及び下層に、当該導電体層よりも電気抵抗の高い材料からなる層を備えていても良い。上記導電体層の上層及び下層に当該導電体層よりも電気抵抗の高い材料からなる層を備えている場合には、上記積層体に電流を流したときに、当該電流が導電体層に集中することとなる。

【0027】また、本発明に係る情報記録方法では、導電性を有する材料を含む導電体層が磁性層の間に位置するように導電体層と複数の磁性層とが積層されてなる積層体を構成する。そして、本発明に係る方法記録方法では、上記積層体の導電体層に電流を流すことで、磁性層間の磁氣的結合状態を変化させて、磁性層の磁化方向を制御し、磁性層の磁化の向きにより、二値もしくはそれ以上の多値記録を行う。

【0028】なお、上記情報記録方法において、上記導電体層には、例えば、単相で磁気秩序を示す物質と非磁性の物質との両方を含む複合材料を用いても良いし、また、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とを交互に形成した積層薄膜又は組成変調膜を用いても良いし、また、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とが3次元的に混じり合った構造のものを用いても良い。

【0029】また、上記情報記録方法では、上記導電体

層の上層及び下層に、当該導電体層よりも電気抵抗の高い材料からなる層を配するようにしても良い。上記導電体層の上層及び下層に当該導電体層よりも電気抵抗の高い材料からなる層を配した場合には、上記積層体に電流を流したときに、当該電流が導電体層に集中することとなる。

【0030】また、本発明に係る情報記録素子は、導電性を有する材料を含む導電体層が磁性層の間に位置するように導電体層と複数の磁性層とが積層されてなる積層体を備える。そして、上記積層体の導電体層に電流を流すことで、磁性層間の磁氣的結合状態を変化させて、磁性層の磁化方向を制御し、磁性層の磁化の向きにより、二値もしくはそれ以上の多値記録を行う。この情報記録素子では、例えば、磁気光学的カー効果やファラデー効果等の磁気光学効果を利用して磁性層の磁化の向きが検出されることで、記録された情報が読み出される。

【0031】なお、上記情報記録素子において、上記導電体層は、例えば、単相で磁気秩序を示す物質と非磁性の物質との両方を含む複合材料からなるものであっても良いし、また、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とを交互に形成した積層薄膜又は組成変調膜からなるものであっても良いし、また、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とが3次元的に混じり合った構造のものであっても良い。

【0032】また、上記情報記録素子は、上記導電体層の上層及び下層に、当該導電体層よりも電気抵抗の高い材料からなる層を備えていても良い。上記導電体層の上層及び下層に当該導電体層よりも電気抵抗の高い材料からなる層を備えている場合には、上記積層体に電流を流したときに、当該電流が導電体層に集中することとなる。

【0033】また、本発明に係る可変抵抗素子は、第1の磁性層と、導電体層と、第2の磁性層と、非磁性層と、第3の磁性層とが積層されてなる積層体を備える。そして、上記積層体の導電体層に電流を流すことで、第1の磁性層と第2の磁性層との間の磁氣的結合状態を変化させて、第2の磁性層の磁化方向を制御するとともに、第2の磁性層の磁化方向を制御することで、第2の磁性層、非磁性層及び第3の磁性層に至る経路の電気抵抗を制御する。

【0034】なお、上記可変抵抗素子において、上記導電体層は、例えば、単相で磁気秩序を示す物質と非磁性の物質との両方を含む複合材料からなるものであっても良いし、また、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とを交互に形成した積層薄膜又は組成変調膜からなるものであっても良いし、また、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とが3次元的に混じり合った構造のものであっても良い。

【0035】また、上記可変抵抗素子は、上記導電体層の上層及び下層に、当該導電体層よりも電気抵抗の高い

材料からなる層を備えていても良い。上記導電体層の上層及び下層に当該導電体層よりも電気抵抗の高い材料からなる層を備えている場合には、上記積層体に電流を流したときに、当該電流が導電体層に集中することとなる。

【0036】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態について、図面を参照しながら詳細に説明する。

【0037】 1. 本発明の原理

本発明では、外部からの磁界印加に依ることなく、固体中の磁気的な相互作用（交換相互作用：exchange interaction）を駆動力として、素子の構成要素である磁性層に磁化反転を生じさせるようにする。ここで、磁化反転が生じる磁性層は、磁化方向が変化することから「可動磁性層」と呼ぶこともできるし、情報記録素子を想定すれば「記録担体」と呼ぶこともできる。

【0038】交換相互作用は、強磁性体の内部で原子の磁気モーメントを一方向に揃えている起源にほかならない。また、図1に示すように、磁性体Aと磁性体Bとが接触しているときには、両者の間にも、接触する界面Sを通じて交換相互作用が働く。更に、図2に示すように、磁性体Aと磁性体Bとが直接接合しておらず、磁性体Aと磁性体Bとの間に中間層Cが存在していたとしても、磁性体Aと磁性体Bとの間の交換相互作用が、中間層Cを介して伝搬する場合がある。ここで、中間層Cが磁性体の場合は、当然の事ながら交換相互作用が伝搬するが、中間層Cが、それ自身では磁性を示さないCu、Auなどの非磁性金属やSi、Geのような半導体の場合であっても、中間層Cを介して交換相互作用が伝搬することが確認されている。そして、そのような交換相互作用の伝搬の起源を説明する理論（RKKYモデルなど）も提案されている。

【0039】そして、本発明では、このような交換相互作用を利用して、磁性体の磁化方向を制御するようにしている。以下、交換相互作用を利用して磁化方向を制御する方法について、具体的な例を挙げて説明する。

【0040】図2に示したように、磁性体Aと磁性体Bとが直接接合しておらず、磁性体Aと磁性体Bとの間に中間層Cが存在しているとする。ここで、磁性体Aは、磁化方向が変化しやすい軟磁性体であるとする。また、磁性体Bは、固定した磁化方向をもつ永久磁石であるとする。また、磁性体Aと磁性体Bと間の中間層Cは、強磁性体であるが、それ以上の温度では磁気秩序を失うキュリー温度 T_c が低い材料であるとする。

【0041】このとき、温度が中間層Cのキュリー温度 T_c よりも高い環境下では、中間層Cの中に磁気秩序がないので、磁性体Aには磁性体Bからの影響が伝わらず、磁性体Aの磁化は外場によって勝手な方向を向いている。このまま温度を下げてキュリー温度 T_c よりも低い温度になると、中間層Cの中に磁気秩序が生じ、中間

層Cを介して、磁性体A、Bに磁化方向を揃えようとする相互作用が働く。このとき、磁性体Bは永久磁石なので、それまで勝手な方向を向いていた磁性体Aの磁化方向が、磁性体Bの磁化方向に揃うように変化する。この磁性体Aの磁化方向の変化は、外部磁界によるものでなく、固体中の交換相互作用によって引き起こされたものである。

【0042】本発明に係る磁化制御方法では、このような交換相互作用を駆動力として、磁性体の磁化方向を制御するようにしている。なお、本発明では、交換相互作用を上述の例のように環境温度によって変化させるのではなく、電気的入力によって制御するようにしている。

【0043】そして、本発明に係る磁気機能素子は、このような交換相互作用を駆動力として磁化方向を変化させる操作を利用する素子である。換言すれば、本発明に係る磁気機能素子は、磁性材料を含む複数の薄膜の多層構造と電気的入出力の端子とから構成される素子であって、素子の動作に強磁性体の磁化方向が変わる過程を含んでいる。そして、強磁性体の磁化方向の変化が、強磁性体に印加される外部磁界の変化に起因するものではなく、固体中の交換相互作用の変化に基づくことを特徴としている。

【0044】以上のように、本発明に係る磁化制御方法では、固体中の交換相互作用を駆動力として、磁性体の磁化方向を制御するようにしており、これを利用することで、例えば、情報記録素子を構成することができる。なお、情報記録素子を構成するときは、磁化方向が適度に変化しやすい数十 Oe の保磁力を有する磁性体Aを記録担体として用い、永久磁石からなる磁性体Bを記録担体への書き込み操作の駆動源として用いる。そして、磁性体Aの磁化の向きにより、二値もしくはそれ以上の多値記録を行う。

【0045】ここで、磁化方向が適度に変化しやすい数十 Oe の保磁力を有する磁性体Aを記録担体として用いるとともに、永久磁石からなる磁性体Bを記録担体への書き込み操作の駆動源として用いた情報記録素子における交換相互作用について説明する。

【0046】なお、磁性体A、Bは、積層膜とされているとする。積層膜では、磁性体の体積に比して接触面が大きく、交換相互作用を効果的に伝えることができる。そして、以下の説明では、磁化方向が適度に変化しやすい数十 Oe の保磁力を有する磁性体Aの層は、記録担体として用いられるので、記録担体層と称する。また、永久磁石からなる磁性体Bの層は、磁化方向が一定の方向を向くように固定されているので、固定磁性層と称する。また、本発明に係る情報記録素子は、小さな素子とすることを考えているので、記憶担体層は、単磁区構造であるとする。

【0047】一般に2層間の交換相互作用によるポテンシャルエネルギー U_{ex} は、界面の面積Sに比例する。そ

して、記録担体層の磁化方向を θ 、固定磁性層の磁化方向を θ_{flx} とすると、2層間の交換相互作用によるポテンシャルエネルギー U_{ex} は、係数 J を用いて下記式(1)

$$U_{ex} = -S \cdot J \cdot \cos(\theta - \theta_{flx}) \quad \dots (1-1)$$

一方、記録担体層は、外部磁界 H の中では、当該外部磁界 H によるポテンシャルエネルギー(Zeeman Energy) U_Z をもつ。このポテンシャルエネルギー U_Z は、記録担体層の飽和磁束密度を M_S 、厚さを t とし、外部磁界 H

$$U_Z = -S \cdot t \cdot M_S \cdot H \cdot \cos(\theta - \theta_H) \quad \dots (1-2)$$

上記式(1-1)及び式(1-2)に示すように、交換相互作用によるポテンシャルエネルギー U_{ex} と、外部磁界によるポテンシャルエネルギー U_Z とは、同じ形をしている。すなわち、交換相互作用も外部磁界と同じように記録担体層の磁化方向を変える働きをもつ。したがっ

$$-S \cdot J \cdot \cos(\theta - \theta_H) = -S \cdot t \cdot M_S \cdot H_{ex} \cdot \cos(\theta - \theta_H) \quad \dots (1-3)$$

したがって、交換相互作用の大きさを磁界に換算した値 H_{ex} は、下記式(1-4)で表すことができる。

【0051】

$$H_{ex} = J / (M_S \cdot t) \quad \dots (1-4)$$

そして、記録担体層の保磁力 H_c が、上記磁界換算値 H_{ex} よりも小さければ、交換相互作用によって磁化反転を生じさせることが可能となる。

【0052】ところで、従来は、導線に電流を流すこと

$$H = 12500 \times D' \text{ [A/m]} = 156 \times D' \text{ [Oe]} \quad \dots (3)$$

一方、上記式(1-4)から分かるように、交換相互作用による磁化反転の作用は、界面の面積に依らない。したがって、素子のサイズが微細化する技術動向の過程でいずれ必ず、本発明の交換相互作用による磁化反転の作用が、従来の磁界印加の作用を凌駕するようになる。

【0054】例えば、交換相互作用の値として、 $J = 0.05 \text{ mJ/m}^2$ 、記録担体層の厚さ $t = 10 \text{ nm}$ 、記録担体層の飽和磁束密度 $M_S = 1 \text{ T}$ とし、これらの値を上記式(1-4)式に代入すると、交換相互作用の磁界換算値 $H_{ex} = 5000 \text{ A/m} = 630 \text{ Oe}$ となる。一方、上記式(3)で表される磁界強度 H が 630 Oe となるのは、導線の径 $D' = 0.4 \mu\text{m}$ の場合である。

【0055】すなわち、本発明に係る磁化制御方法が、導線に電流を流すことで発生する磁界を利用するような方法よりも有効となる素子サイズは、サブミクロンの領域である。そして、近年の技術動向を考えると、磁気メモリ等において、やがてデザインルールがサブミクロンのオーダーになるのは確実である。したがって、本発明に係る磁化制御方法が、導線に電流を流すことで発生する磁界を利用するような方法を、やがて凌駕するようになるのは明らかである。

【0056】ここで、情報記録素子のセル寸法 L と、記録担体の駆動に用いることができる駆動磁界 H との関係について、導線に電流を流すことで発生する磁界を利用する電流磁界方式と、固体中の交換相互作用を利用する

−1)のように表される。

【0048】

の方向を θ_H とすると、下記式(1-2)のように表される。

【0049】

て、交換相互作用の大きさを磁界換算値 H_{ex} として扱うことができる。すなわち、 θ_{flx} と θ_H を等値とし、また、 U_{ex} と U_Z を等値すれば、下記式(1-3)が成り立つ。

【0050】

で発生する磁界を記録担体に印加するようにしていたが、導線に電流を流すことで記録担体に印加できる磁界強度 H は、上述したように、式(3)で表される。すなわち、導線に電流を流すことで記録担体に磁界を印加するようにしたとき、利用できる磁界の大きさは、導線の径 D' に比例する。

【0053】

交換結合方式とを比較して図3に示す。なお、電流磁界方式において、導線の径 D' はセル寸法の0.8倍と仮定した。図3に示すように、電流磁界方式では、セル寸法が小さくなるにつれて、導線から印加できる磁界が小さくなる。一方、積層構造での交換相互作用はセル寸法に依らないので、交換結合方式は微細化が進むと有利になる。

【0057】以上のように、交換相互作用の磁界換算値 H_{ex} はセル寸法に依存しないので、交換相互作用を利用して記録担体の磁化を制御するにすれば、微細化が進んでも、保磁力 H_c が大きい磁性薄膜を記録担体として利用することが可能となる。具体的には、図3からも分かるように、セル寸法が非常に小さくなくても、保磁力が数十[Oe]以上の磁性薄膜を記録担体に用いることが可能となる。なお、飽和磁束密度 M_S の値を下げれば、記録担体の保磁力を更に大きくすることも可能である。しかも、本発明を適用したときの磁化反転の作用は、接触する材料間だけに生じる交換相互作用に基づいているので、近隣素子へのクロストークの問題も回避することができる。

【0058】2. 素子の具体例

つぎに、以上のような原理を利用した本発明に係る素子について、具体的な例を挙げて詳細に説明する。

【0059】2-1 磁気機能素子

本発明を適用した磁気機能素子の一例を図4及び図5に

示す。この磁気機能素子10は、図4及び図5に示すように、ガラス基板11の上に形成された固定磁性層12と、固定磁性層12の上に形成された導電体層13と、導電体層13の両端にそれぞれ接続された電極14、15と、導電体層13の上に絶縁層16を介して形成された可動磁性層17とを備える。

【0060】ここで、固定磁性層12は、保磁力の高い酸化物磁性材料からなり、磁化方向が一定の方向に固定される。すなわち、固定磁性層12は、素子動作のなかで磁化方向が変化せず固定状態にあるという意味で「固定磁性層」と称している。一方、可動磁性層17は、保磁力の小さい磁性材料からなり、この磁気機能素子10では、可動磁性層17の磁化方向の制御が可能となっている。すなわち、可動磁性層17は、素子動作のなかで磁化方向が可変であるという意味で「可動磁性層」と称している。

【0061】導電体層13は、導電性を有する材料からなり、固定磁性層12と可動磁性層17との磁氣的結合状態を制御するための層である。すなわち、この導電体層13は、換言すれば、固定磁性層12と可動磁性層17との磁氣的結合状態を制御するための結合制御層であるとも言える。

【0062】この磁気機能素子10では、導電体層13に電極14、15を介して電流を流すことで、固定磁性層12と可動磁性層17との間の交換相互作用の状態を変化させて、可動磁性層17の磁化方向を制御することが可能となっている。換言すれば、この磁気機能素子10では、交換相互作用を電気入力で制御して、素子要素の磁化方向を制御することが可能となっている。

【0063】ところで、この磁気機能素子10において、導電体層13の下層には、電気抵抗の高い酸化物材料からなる固定磁性層12が形成されており、導電体層13の上層には、電気抵抗の高い絶縁層16が形成されている。このように、導電体層13の上層及び下層に、電気抵抗の高い材料からなる層を形成することで、電極14、15から電流を供給したときに、当該電流は導電体層13に効果的に集中することとなる。したがって、この磁気機能素子10は、低電流で駆動することが可能となっている。

【0064】なお、この磁気機能素子10は、可動磁性層17の磁化方向を制御するという機能を備えた素子であるが、その用途は特に限定されるものではない。例えば、後述するように、電気光学変調器として使用することも可能であるし、情報記録素子として使用することも可能であるし、また、可変抵抗素子や増幅素子として使用することも可能である。

【0065】2-1-1 磁気機能素子の作製方法

本発明者は、5源マグネトロンスパッタ装置を用いて、上記磁気機能素子10を実際に作製した。以下、その作製手順について説明する。

【0066】(i) 固定磁性層の形成

まず、BK-7からなるガラス基板11の上に、コバルト・フェライト薄膜からなる固定磁性層12を形成した。具体的には、250℃に加熱したガラス基板11の上に、縦(y方向)20μm×横(x方向)220μmの長方形の開口部をもつ第1のマスクを通して、コバルト・フェライト薄膜を堆積させた。ここで、コバルト・フェライト薄膜の堆積は、CoFe₂O₄の焼結体ターゲットを用い、RF-マグネトロンスパッタリングにより、堆積速度0.3nm/sにて、厚さが300nmとなるように行った。このとき、スパッタガスには、ArにO₂を10%添加したものを用い、その供給量は20sccmとし、スパッタガス圧は3mTorrとした。

【0067】(ii) 導電体層の形成

次に、固定磁性層12の上に、Cr膜とFe-Ag膜とを繰り返し積層した多層膜からなる導電体層13を形成した。具体的には、Fe-Agモザイクターゲット(中心角15°の扇形Ag板6枚をFeターゲット上に並べたもの)とCrターゲットとのふたつを同時にスパッタしながら、固定磁性層12が形成されたガラス基板11が、それぞれのターゲット上に交互に滞在するようにして、Cr膜とFe-Ag膜とが繰り返し積層されてなる多層膜を室温で堆積した。このとき、各Cr膜の膜厚は0.9nm、各Fe-Ag膜の膜厚は1.5nmとした。また、堆積の順序は、固定磁性層12の上にFe-Ag膜から堆積を開始し、16周期と半分堆積してFe-Ag膜が一番上になるようにした。

【0068】(iii) 絶縁層の形成

次に、導電体層13の上に、酸化アルミニウムからなる絶縁層16を形成した。具体的には、先ず、既に堆積されたパターンの中心に重なるように、縦20μm×横20μmの正方形の開口部を有するMoマスクを配した上で、厚さ0.8nmのAl薄膜を堆積した。その後、スパッタ装置の基板エッチング機能を用いて、当該Al薄膜をプラズマ酸化させて絶縁層16とした。なお、Al薄膜のプラズマ酸化は、Arに5%のO₂を添加した雰囲気下で、ガス圧を10mTorrとして行った。

【0069】(iv) 可動磁性層の形成

次に、絶縁層16の上に、Ni₇₈Fe₂₂合金薄膜からなる可動磁性層17を形成した。具体的には、既に堆積されたパターンの中心に重なるように、縦3μm×横3μmの正方形の開口部を有するMoマスクを配した上で、ガラス基板11を160℃に加熱しながら、厚さ10nmのNi₇₈Fe₂₂合金薄膜を堆積させた。このとき、Ni₇₈Fe₂₂合金薄膜の堆積は、当該Ni₇₈Fe₂₂合金薄膜に磁気異方性を付与するために、パターンの縦の辺に平行な方向(y方向)に500eの磁界を印加しながら行った。

【0070】(v) 電極の形成

次に、導電体層13の両端上に、Auからなる電極1

4, 15を形成した。具体的には、導電体層13の両端上にそれぞれ重なるように(すなわち既に堆積されたパターンの左右両端に重なるように)、縦 $100\mu\text{m}$ ×横 $100\mu\text{m}$ 、厚さ 200nm のAu薄膜を堆積させた。

【0071】(vi) 固定磁性層の着磁

最後に、室温にて、電磁石を用いて、パターンの横の辺に平行な方向(x方向)に 2kOe の磁界を印加し、固定磁性層12の磁化方向を+x方向に揃えて、図4及び図5に示したような磁気機能素子10を完成した。

【0072】2-1-2 交換相互作用の確認

つぎに、以上のようにして作製した磁気機能素子10に外部磁界を印加し、可動磁性層17の磁化履歴を観測して、交換相互作用の存在を確認した結果について説明する。

【0073】可動磁性層17の磁化履歴の観測には、材料表面層の磁化に比例する磁気光学的カー効果(MOE: Magneto-Optical Kerr Effect)を利用した。すなわち、図6に示すように、x-z面内、y-z面内のそれぞれに一組ずつ、磁気光学的カー効果測定装置を配し、x方向の磁化成分に比例するカー回転角と、y方向の磁化成分に比例するカー回転角とをそれぞれ測定した。

【0074】ここで、x方向のカー回転角を測定する磁気光学的カー効果測定装置は、図6に示すように、波長 670nm の可視光レーザーを出射する半導体レーザー21xと、偏光子22xと、第1のレンズ23xと、第2のレンズ24xと、検光子25xと、光検出器26xとが、x-z面内に配されてなる光学系を備える。そして、この磁気光学的カー効果測定装置は、半導体レーザー21xから出射されたレーザー光を、偏光子22x及び第1のレンズ23xを介して、磁気機能素子10の可動磁性層17に照射し、その反射光を第2のレンズ24x及び検光子25xを介して光検出器26xで検出することで、x方向の磁化成分に比例するカー回転角を測定する。ここで、磁気機能素子10の可動磁性層17に照射するレーザー光の入射角、及び当該レーザー光の偏光面は、可動磁性層17による磁気光学的カー効果のみを効率良く検出できるように設定しておく。

【0075】一方、y方向のカー回転角を測定する磁気光学的カー効果測定装置は、図6に示すように、波長 670nm の可視光レーザーを出射する半導体レーザー21yと、偏光子22yと、第1のレンズ23yと、第2のレンズ24yと、検光子25yと、光検出器26yとが、y-z面内に配されてなる光学系を備える。そして、この磁気光学的カー効果測定装置は、半導体レーザー21yから出射されたレーザー光を、偏光子22y及び第1のレンズ23yを介して、磁気機能素子10の可動磁性層17に照射し、その反射光を第2のレンズ24y及び検光子25yを介して光検出器26yで検出することで、y方向の磁化成分に比例するカー回転角を測定す

る。ここで、磁気機能素子10の可動磁性層17に照射するレーザー光の入射角、及び当該レーザー光の偏光面は、可動磁性層17による磁気光学的カー効果のみを効率良く検出できるように設定しておく。

【0076】また、可動磁性層17の磁化履歴を観測するために、大きさや方向を変化させて、磁気機能素子10に対して外部磁界を印加した。ここで、磁気機能素子10への外部磁界の印加は、図6に示すように、磁気機能素子10を両側から挟むように配置された一対のコイル27, 28によって行った。そして、コイル27, 28に流す電流や、当該コイル27, 28の位置を変化させることで、磁気機能素子10に印加する磁界の大きさや方向を変化させた。

【0077】ところで、前もって試料振動型磁力計(VSM: Vibrating Sample Magnetometer)で固定磁性層12の面内磁化曲線を測定したところ、当該磁化曲線は良好な角形を有し、保磁力は 10600e であった。そこで、磁気光学的カー効果による可動磁性層17の磁化履歴の観測は、+x方向に着磁された固定磁性層12の磁化状態を変化させないように、印加磁界強度 $\pm 500\text{e}$ までの範囲で行った。そして、可動磁性層17の磁化履歴の観測は、導電体層13に電流を供給していないときのx方向の磁化履歴と、導電体層13に電流を供給していないときのy方向の磁化履歴と、導電体層13に電流を供給しているときのx方向の磁化履歴と、導電体層13に電流を供給しているときのy方向の磁化履歴との4通りについて行った。

【0078】先ず、導電体層13に電流を供給していないときの可動磁性層17の磁化履歴を観測した。x方向の磁化履歴の観測結果を図7の上段左側に示すとともに、y方向の磁化履歴の観測結果を図7の上段右側に示す。図7の上段左側に示したx方向の磁化履歴は、左右対称な履歴曲線が左側にずれた形となっている。このことから、可動磁性層は、+x方向に磁化されやすいようなバイアスを受けていることが分かる。一方、図7の上段右側に示したy方向の磁化履歴から分かるように、導電体層13に電流を供給していないとき、零磁界ではy方向の残留磁化が非常に小さくなっている。これらのことから、零磁界において、可動磁性層17の磁化方向は、ほぼx方向を向いていることが分かる。

【0079】次に、導電体層13に 1.2mA の電流を供給しながら、可動磁性層17の磁化履歴を観測した。x方向の磁化履歴の観測結果を図7の下段左側に示すとともに、y方向の磁化履歴の観測結果を図7の下段右側に示す。これらの観測結果から分かるように、導電体層13に電流を供給すると、可動磁性層17はy方向に磁化容易な特性を示した。

【0080】なお、電流供給を止めて再び可動磁性層17の磁化履歴を観測すると、可動磁性層17は、再び図7の上段に示したような磁化履歴を示した。したがっ

て、導電体層 17 に電流を供給するか否かによる磁気特性の変化は、可逆であることが分かった。

【0081】ここで、比較のために、非磁性基板上に Ni-Fe 合金薄膜だけを形成し、当該 Ni-Fe 合金薄膜の磁化履歴を観測した結果を図 8 に示す。なお、この観測のための試料は、可動磁性層 17 を形成すると同時に y 方向に磁界を印加した環境下にて、Ni-Fe 合金薄膜をガラス基板の上に直接堆積させることにより作製した。図 8 に示すように、y 方向に磁界を印加した環境下にて作製された Ni-Fe 合金薄膜の y 方向の磁化曲線は、保磁力も残留磁化も大きく、この Ni-Fe 合金薄膜には、y 方向に磁化容易な磁気異方性が作り込まれていることが分かる。

【0082】図 8 から分かるように、磁界中で堆積された Ni-Fe 合金薄膜は、その印加磁界の方向に磁化容易軸をもつようになる。したがって、磁気機能素子 10 の可動磁性層 17 も単独では y 方向に磁化容易なはずであり、図 7 に示した観測結果の特性は、下地層からの影響を反映しているものと考えられる。

【0083】上述したように、導電体層 13 に電流を供給していない場合、可動磁性層 17 は零磁界で +x 方向に磁化を向けやすいバイアスを受けているが、これは、+x 方向に磁化した下地層から磁化方向を同じ向きに揃えようとする強磁性的な相互作用の伝搬があること示唆している。一方、導電体層 13 に電流を供給している場合、可動磁性層 17 は、図 8 に示した比較用試料の観測結果に似た特性を示し、可動磁性層自身のもつ特性がより顕著に現れている。このことから、導電体層 13 に電流を流すことで、下地層からの影響が弱くなることが分かる。

【0084】以上の観測結果から、可動磁性層 17 と、当該可動磁性層 17 の下地層となっている固定磁性層 12 との間に交換相互作用が存在しており、しかも、その交換相互作用は、導電体層 13 に電流を供給することによって弱まることが確認された。

【0085】2-1-3 スイッチ動作の検証

零磁界状態での各方向の磁化成分の比を図 7 から読みとり、これから推定した可動磁性層 17 の磁化ベクトルの方向を図示すると、図 9 に示すようになった。そして、この図 9 より、可動磁性層 17 の磁化は、その絶対値は変わらず、その方向の x 方向と成す角が約 20° から約 85° の間でスイッチしていることが分かった。そこで、導電体層 13 に供給する電流の ON/OFF によって、可動磁性層 17 の磁化ベクトルが、この 2 方向の間でスイッチされることを実際に検証した。

【0086】スイッチ動作の検証は、図 6 に示したような 2 組の磁気光学的カー効果測定装置を同時に用い、可動磁性層 17 の x 方向の磁化成分に比例する x 方向のカー回転角と、可動磁性層 17 の y 方向の磁化成分に比例する y 方向のカー回転角とを監視しながら、導電体層 1

3 に供給する電流の ON/OFF を切り換えることにより行った。

【0087】結果を図 10 に示す。なお、図 10 において、 θ_{K-x} は x 方向のカー回転角を示しており、 θ_{K-y} は y 方向のカー回転角を示しており、電流 I は、導電体層 13 に供給した電流を示している。図 10 に示すように、可動磁性層 17 の磁化方向には、導電体層 13 に供給する電流の ON/OFF 動作に同期した変化が認められ、導電体層 13 への電流入力がある間だけ出力が変化”モメンタリ”なスイッチ動作が検証された。

【0088】なお、導電体層 13 に電流を供給したとき、可動磁性層 17 の磁化ベクトルは、電流の流れる方向と成す角が大きくなるように変化したが、電流の極性を変えてもスイッチされる角度範囲は変わらなかった。このことから、電流の作る磁界が可動磁性層 17 の磁化方向の変化に果たす役割は小さく、スイッチ動作の原動力が、交換相互作用の変化であることが分かる。

【0089】ところで、上記磁気機能素子 10 において、導電体層 13 の上下層は、導電体層 13 よりも電気抵抗の遥かに高い酸化物とされているので、電極 14、15 を介して供給した 1.2 mA の電流は殆ど導電体層 13 のみに流れる。そして、上記磁気機能素子 10 において、幅が $20\ \mu\text{m}$ の導電体層 13 のうち、縦 $3\ \mu\text{m}$ × 横 $3\ \mu\text{m}$ の可動磁性層 17 のスイッチ動作に関与する部分は、中央の $3\ \mu\text{m}$ だけである。したがって、正味 0.18 mA の電流でスイッチ動作が達成されたことになる。

【0090】このように、上記磁気機能素子 10 では、非常に小さい電流でスイッチ動作を行うことができる。例えば、M-RAM において、記録担体の磁化を制御するために導線に流す電流を 1 mA 程度にまで小さくしたという報告例があるが、上記磁気機能素子 10 では、それよりも遥かに小さい電流でスイッチ動作を行うことが可能となっている。しかも、交換相互作用によって磁化を制御する本発明の方式では、セル寸法が更に小さくなればスイッチ動作のために必要な電流も更に小さくなる。なお、導電体層 13 に 1.2 mA の電流を供給したとき、その電流密度は、およそ $1.56 \times 10^9\ \text{A}/\text{m}^2$ である。この値は、既存の M-RAM 等において記録担体の磁化を制御するために導線に流す電流の電流密度とほぼ同程度である。

【0091】2-1-4 導電体層の作用

上記磁気機能素子 10 では、Cr 膜と Fe-Ag 膜とを繰り返し積層した多層膜を、固定磁性層 12 と可動磁性層 17 との間の交換相互作用を制御する導電体層 13 として用いた。以下、この導電体層 13 によって、固定磁性層 12 と可動磁性層 17 との間の交換相互作用を制御する機構について説明する。

【0092】Cr 膜と Fe 膜とを積層した多層膜では、Cr 膜の厚さを適切 ($0.7\ \text{nm}$ 程度) に選ぶと、その

10

20

30

40

50

両側のFe膜の磁化が互いに平行逆向きになる反強磁性的結合を生じることが知られている。そして、Fe膜の代わりにFe-Ag膜を用いても、Cr膜を挟んで同様な磁氣的結合が起こる。ただし、Fe膜の代わりにFe-Ag膜を用いた場合には、Agを含むために多層膜全体を通じた磁氣的結合の強さが弱くなる。

【0093】そして、上記磁気機能素子10では、Cr膜が偶数枚あるので、最下層のFe-Ag膜と、最上層のFe-Ag膜との間には、両者の磁気モーメントを平行で同じ向きに揃えようとする強磁性的結合が生じる。

【0094】ここで、最初に堆積されたFe-Ag膜は、コバルト・フェライト薄膜からなる固定磁性層12と強磁性的に結合する。一方、最後に堆積されたFe-Ag膜の上には、酸化アルミニウムからなる絶縁層16が形成されているが、この絶縁層16は極めて薄いために多数のピンホールをもっている。そのため、最上層のFe-Ag膜は、それらのピンホールを介して、その上に形成されたNi-Fe合金薄膜からなる可動磁性層17と強磁性的に結合する。そして、固定磁性層12から可動磁性層17までの結合を順にたどると、固定磁性層12と可動磁性層17との間には、強磁性的結合が生じることが分かる。これは、図7の上段に示した磁気特性からの帰結とも一致している。

【0095】なお、上記磁気機能素子10では、導電体層13に電流を供給したときに、固定磁性層12と可動磁性層17との間の磁氣的結合が弱まるが、このような磁氣的結合強度の減衰について、その要因をひとつに絞り込むことは困難である。しかし、その機構は推定できる。すなわち、導電体層13に電流を供給すると、当該電流によって導電体層13の中に過剰な電子散乱が生じて、積層膜の膜面に垂直な方向にスピンの運ばれ、上下の磁性層間において交換結合を媒介している電子が乱されて、磁氣的結合が弱められると考えられる。また、電流による温度上昇は、導電体層中の磁気秩序を弱めるものであるから、電流による温度上昇によって磁氣的結合が分断され、その結果、導電体層全体として媒介する磁氣的結合の強さが減衰するものと考えられる。

【0096】ここで、導電体層13の一例を図11に示す。図11に示す導電体層13Aは、複数の磁性層13aと、それらの磁性層13aの間に配された中間層13bとが積層されてなる。なお、図11に示す導電体層13Aでは、磁性層13aを4層、中間層13bを3層としているが、上述の磁気機能素子10において用いた導電体層13では、磁性層13aを17層、中間層13bを16層としている。ただし、これらの層数は特に限定されるものではなく、所望する磁氣的結合状態に応じて適宜変更可能である。

【0097】また、上記磁気機能素子10の導電体層13では、磁性層13aとしてFe-Ag膜を使用し、中間層13bとしてCr膜を使用した。磁性層13aや

中間層13bの材料は、これらに限定されるものではない。

【0098】例えば、磁性層13aには、Fe、Co、Ni等の強磁性金属や、それらの強磁性金属を非磁性金属で希釈した合金などを用いることができる。一方、中間層13bには、Ti、V、Mn、Cu、Zr、Nb、Mo、Ru、Rh、Pd、Ag、Hf、Ta、W、Re、Ir、Pt、Auなど、殆どの金属が使用可能である。また、上述した導電体層13で用いたように、室温でそれ自身が反強磁性であるCrも、当然の事ながら中間層13bとして使用可能である。そして、このような積層構造を有する導電体層13Aにおいて、得られる磁氣的結合が強磁性的か反強磁性的か、或いは、それらの磁氣的結合の強度はどの程度であるかなどについては、例えば、磁性層13aの種類や、中間層13bの厚さや、磁性層13a及び中間層13bの層数などによって、様々に変更可能である。

【0099】なお、磁気機能素子10に使用される導電体層13は、電氣的入力に従って固体中の磁氣的相互作用の伝搬の仕方が変化する機能をもつものであれば良い。したがって、導電体層13は、例えば、単相で磁気秩序を示す物質と非磁性の物質との両方を含む複合材料からなるものであっても良い。この場合は、多源のスパッタ装置を用いるようなことなく導電体層13を形成でき、導電体層13の形成が容易であるという利点がある。

【0100】また、導電体層13は、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とを交互に形成した積層薄膜又は組成変調膜からなるものであっても良い。この場合は、導電体層13の構造の制御がしやすいので、特性の再現性が高いという利点がある。しかも、膜厚や積層周期を変えることによって、材料設計や特性の合わせ込みを行うことも容易である。なお、図11に示した導電体層13Aは、これに含まれる。

【0101】また、導電体層13は、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とが3次的に混じり合った構造とされていても良い。この場合は、強さの異なる磁気結合の経路が多数存在するので、弱い結合から順に切っていくようにすれば、磁気結合を漸減させることが可能となる。したがって、このような構造は、例えば、後述する可変抵抗素子のように、アナログ的動作を行うような場合に特に好適である。

【0102】ここで、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とが3次的に混じり合った構造を有する導電体層13の一例を図12に示す。図12に示す導電体層13Bは、強磁性微粒子13cが非磁性体13dの内部に分散した微粒子分散構造となされている。このような微粒子分散構造の導電体層13Bでは、磁氣的結合が強磁性微粒子13cの間を飛び石のようにして伝わり、その結果、導電体層13Bの上下に配された固定磁性層12と

10

20

30

40

50

可動磁性層 17 とが磁氣的に結合することとなる。

【0103】このとき、強磁性微粒子間の磁氣的結合は非常に弱く、当該磁氣的結合は、電流が流れると過剰な電子散乱や温度上昇などによって分断されやすい。すなわち、微粒子分散構造の導電体層 13B の場合、その上下に配された固定磁性層 12 と可動磁性層 17 との磁氣的結合は、強磁性微粒子間の微弱な磁氣的結合に依存しており、導電体層 13B に流れる電流によってマクロな磁氣的結合が分断されやすい。

【0104】なお、微粒子分散構造の導電体層 13B において、強磁性微粒子 13c の材料には、積層構造の導電体層 13A を構成する磁性層 13a の材料として例示したものと同様な材料が、いずれも使用可能である。また、強磁性微粒子 13c が分散される非磁性体 13d の材料には、積層構造の導電体層 13A を構成する中間層 13b の材料として例示したものと同様な材料が、いずれも使用可能である。

【0105】ところで、このような微粒子分散構造を、積層構造の一要素として用いることもできる。実際に、上記磁気機能素子 10 では、導電体層 13 に Fe-Ag 膜を用いたが、この Fe-Ag 膜は、非固溶の 2 相混合系材料からなるので、正確には、微粒子分散構造になっているとも言える。

【0106】なお、磁気機能素子 10 に使用する導電体層 13 としては、2 つ以上の相が共存するようなものばかりでなく、補償点付近の状態にある単相のフェリ磁性体も利用可能である。補償点付近の状態にある単相のフェリ磁性体は、外部刺激でマクロな磁気特性が顕著に変化する。そこで、補償点付近の状態にある単相のフェリ磁性体を導電体層 13 に用いることで、固定磁性層 12 と可動磁性層 17 との磁氣的結合状態を制御したり、あるいは可動磁性層 17 に対して直接に磁氣的バイアスの変調を行うようなことが可能である。

【0107】2-1-5 出力の方法

上述した実験では、可動磁性層 17 の磁化方向のスイッチ動作の結果を、磁気光学的カー効果を利用して光学的に検出した。このことは、換言すれば、上記磁気機能素子 10 が、電気光学変調器として動作するというでもある。しかし、可動磁性層 17 の磁化方向のスイッチ動作の結果は、電気的出力として得ることもできる。

【0108】可動磁性層 17 の磁化方向のスイッチ動作の結果を電気的出力として得るときには、例えば、図 13 に示すように、可動磁性層 17 の上に非磁性金属からなるスペーサー層 30 と、磁化方向が一定の方向を向くように固定された磁性金属からなる磁性層 31 とを配する。このように、可動磁性層 17 の上にスペーサー層 30 及び磁性層 31 を配することで、可動磁性層 17、スペーサー層 30 及び磁性層 31 のスピンプルブ動作によって、可動磁性層 17 の磁化方向の変化を抵抗変化として検出することが可能となる。

【0109】具体的には例えば、図 13 に示すように、可動磁性層 17 と磁性層 31 とを結ぶように出力回路 32 を構成する。このとき、可動磁性層 17 の磁化方向と磁性層 31 の磁化方向とが成す角度に依存して抵抗が変化し、出力回路に流れる出力電流の大きさが変化することとなる。

【0110】なお、スピンプルブ動作を利用するのではなく、可動磁性層 17 の磁化方向のスイッチ動作の結果を、トンネル磁気抵抗効果を利用して検出することも可能である。トンネル磁気抵抗効果を利用するときには、スペーサー層 30 に絶縁体を用いる。スペーサー層 30 に絶縁体を用いた場合には、出力回路 32 に流れる出力電流の大きさが、トンネル磁気抵抗効果によって変化することとなる。

【0111】また、別の方法として、可動磁性層 17 に 4 つの端子を適切に接続し、それら 4 端子を用いて、可動磁性層 17 の磁化方向に依存するホール効果によって電圧出力を得ることも可能である。

【0112】2-2 一回書き込み型情報記録素子

つぎに、電流による交換相互作用の変調を利用した、一回だけ書き込みが可能な情報記録素子について説明する。

【0113】なお、以下の説明では、可動磁性層の磁化方向をある方向に向かせようとする作用を駆動作用と称する。そして、可動磁性層に対して駆動作用を働かせる層のことを駆動層と称する。すなわち、以下の説明では、上述の磁気機能素子 10 における固定磁性層 12 及び導電体層 13 に相当する部分をまとめて駆動層と称している。

【0114】2-2-1 正論理駆動型情報記録素子

電流による交換相互作用の変調を利用して、一回だけ書き込みを可能とした情報記録素子の一例を図 14 に示す。なお、図 14 は、情報記録素子の駆動原理を説明するための模式図であり、出力回路や入力回路の配線等については省略している。

【0115】図 14 に示すように、この情報記録素子 40 は、駆動層 41 の上に一軸磁気異方性を有する可動磁性層 42 が形成されてなり、可動磁性層 42 の磁化の向きにより、二値の記録を行うことが可能となっている。

なお、図 14 において、矢印 M1 は、可動磁性層 42 の磁化方向を示しており、矢印 A1 は、駆動層 41 から可動磁性層 42 に対して働く駆動作用を示している。

【0116】この情報記録素子 40 は、可動磁性層 42 の磁化方向を変化させるときに駆動層 41 から可動磁性層 42 に対して駆動作用 A1 が働く、いわば「正論理駆動型」の素子である。以下、この情報記録素子 40 の駆動原理について説明する。

【0117】この情報記録素子 40 では、図 14 (a) に示すように、リセット状態において、可動磁性層 42 の磁化方向 M1 を、駆動層 41 からの駆動作用 A1 の方

10

20

30

40

50

向とは逆向きとなるようにしておく。なお、図 1 4 の例では、駆動作用 A 1 の方向は左向きであり、リセット状態では、可動磁性層 4 2 の磁化方向 M 1 を右向きとしている。そして、このリセット状態においては、駆動層 4 1 から可動磁性層 4 2 に対して駆動作用 A 1 が働かないように、駆動層 4 1 を構成する導電体層に電流を供給しておく。

【0118】そして、可動磁性層 4 2 の磁化方向 M 1 を変化させて情報を書き込む「ON 状態」とするときには、駆動層 4 1 を構成する導電体層への電流の供給を止める。これにより、駆動層 4 1 と可動磁性層 4 2 との間に交換相互作用が働き、駆動層 4 1 から可動磁性層 4 2 に対して駆動作用 A 1 が働く。

【0119】このとき、駆動層 4 1 から可動磁性層 4 2 に対して働く駆動作用 A 1 が、可動磁性層 4 2 の保磁力を超える大きさをもつようにしておく。駆動作用 A 1 が可動磁性層 4 2 の保磁力を超えるようになされていれば、図 1 4 (b) に示すように、ON 状態となったときに、可動磁性層 4 2 の磁化が反転し、可動磁性層 4 2 の磁化方向 M 1 が、駆動作用 A 1 の方向に揃うこととなる。すなわち、図 1 4 の例では、ON 状態となったときに、可動磁性層 4 2 の磁化方向 M 1 が左向きとなるように反転する。

【0120】その後、駆動層 4 1 を構成する導電体層への電流の供給を再開して、駆動層 4 1 から可動磁性層 4 2 に対して駆動作用 A 1 が働かないようにしても、反転した可動磁性層 4 2 の磁化方向 M 1 は、一軸磁気異方性のおかげで、図 1 4 (c) に示すように、そのまま保持される。すなわち、駆動層 4 1 から可動磁性層 4 2 に対して駆動作用 A 1 が働かない状態においても、図 1 4 (c) に示すように、可動磁性層 4 2 の磁化方向 M 1 を反転させたセット状態は保持される。

【0121】以上のように、この情報記録素子 4 0 では、駆動層 4 1 を構成する導電体層への電流供給の ON / OFF を切り換えることにより、可動磁性層 4 2 の磁化方向 M 1 を反転させることが可能となっており、可動磁性層 4 2 の磁化の向きにより、二値の記録を行うことが可能となっている。ただし、この情報記録素子 4 0 は、リセット状態を保持するために、駆動層 4 1 を構成する導電体層への電流供給を保ち続けなければならない、不揮発性メモリとはならない。

【0122】なお、本発明者は、以上のような情報記録素子 4 0 として、図 4 及び図 5 に示した磁気機能素子 1 0 と同様に、コバルト・フェライト薄膜からなり x 方向に着磁された固定磁性層と、Cr 膜と Fe - Ag 膜とを繰り返し積層した多層膜からなる導電体層と、酸化アルミニウムからなる絶縁層と、x 軸方向に磁化容易軸をもつ Ni - Fe 合金薄膜からなる可動磁性層とを、ガラス基板上に形成した素子を実際に作製した。

【0123】そして、導電体層への電流供給の ON / O

FF を切り換えたときの可動磁性層の磁化方向の変化を、磁気光学的カー効果を測定することにより調べた。具体的には、まず、導電体層に電流を供給した状態で + x 方向に 4 0 0 e の磁界を印加し、可動磁性層の磁化を + x 方向に揃えた。その後、導電体層に電流を供給したまま印加磁界を取り去ったところ、可動磁性層の磁化は + x 方向に保持されていたが、電流供給を止めると - x 方向への磁化反転が観測された。

【0124】このように、導電体層への電流供給の ON / OFF を切り換えることにより、可動磁性層の磁化方向を変化させることができ、一回書き込みを行うことができることが確認された。ただし、ここでの可動磁性層の磁化方向のスイッチ動作は、図 9 に示したような、可動磁性層の磁化方向と x 方向との成す角が約 2 0 ° から約 8 5 ° の間で変化するスイッチ動作ではなく、平行 / 反平行間でのスイッチ動作であった。

【0125】2 - 2 - 2 負論理駆動型情報記録素子
電流による交換相互作用の変調を利用して、一回だけ書き込みを可能とした情報記録素子の他の例を図 1 5 に示す。なお、図 1 5 は、図 1 4 と同様に、情報記録素子の駆動原理を説明するための模式図であり、出力回路や入力回路の配線等については省略している。

【0126】この情報記録素子 5 0 は、図 1 5 に示すように、駆動層 5 1 の上に一軸磁気異方性を有する可動磁性層 5 2 が形成され、更に、可動磁性層 5 2 の上に駆動層 5 1 からの駆動作用とは逆向きの駆動作用を可動磁性層 5 2 に働きかける反強磁性層 5 3 が形成されてなり、可動磁性層 5 2 の磁化の向きにより、二値の記録を行うことが可能となっている。なお、図 1 5 において、矢印 A 1 は、駆動層 5 1 から可動磁性層 5 2 に対して働く駆動作用を示しており、矢印 A 2 は、反強磁性層 5 3 から可動磁性層 5 2 に対して働く駆動作用を示しており、矢印 M 1 は、可動磁性層 5 2 の磁化方向を示している。

【0127】この情報記録素子 5 0 は、駆動層 5 1 から可動磁性層 5 2 に対して駆動作用 A 1 が働かないようにしたときに、可動磁性層 5 2 の磁化方向 M 1 が変化する、いわば「負論理駆動型」の素子である。以下、この情報記録素子 5 0 の駆動原理について説明する。

【0128】この情報記録素子 5 0 では、図 1 5 (a) に示すように、リセット状態において、可動磁性層 5 2 の磁化方向 M 1 を、駆動層 5 1 からの駆動作用 A 1 の方向と同じ向きとなるようにしておく。なお、図 1 5 の例では、駆動作用 A 1 の方向は右向きであり、リセット状態では、可動磁性層 5 2 の磁化方向 M 1 を右向きとしている。

【0129】この情報記録素子 5 0 において、リセット状態のときには、駆動層 5 1 を構成する導電体層への電流供給は行わない。したがって、リセット状態のとき、可動磁性層 5 2 には、駆動層 5 1 からの駆動作用 A 1 が働いている。しかし、この情報記録素子 5 0 では、矢印

A 2に示すように、駆動層 5 1からの駆動作用 A 1とは逆向きの駆動作用 A 2が、反強磁性層 5 3から可動磁性層 5 2に働いており、駆動層 5 1からの駆動作用 A 1は、反強磁性層 5 3からの駆動作用 A 2によって相殺される。しかし、可動磁性層 5 2は一軸磁気異方性を有しているので、可動磁性層 5 2の磁化方向 M 1は、駆動層 5 1からの駆動作用 A 1や反強磁性層 5 3からの駆動作用 A 2に依ることなく、最初に磁化された方向がそのまま保持される。

【0130】そして、可動磁性層 5 2の磁化方向 M 1を変化させて情報を書き込む「ON状態」とするときには、駆動層 5 1を構成する導電体層に電流を供給する。これにより、駆動層 5 1と可動磁性層 5 2との間の交換相互作用が弱められ、駆動層 5 1から可動磁性層 5 2に対する駆動作用 A 1が働かなくなる。このとき、反強磁性層 5 3から可動磁性層 5 2に対して働く駆動作用 A 2が、可動磁性層 5 2の保磁力を超える大きさをもつようにしておく。反強磁性層 5 3からの駆動作用 A 2が可動磁性層 5 2の保磁力を超えるようになされていれば、図 1 5 (b) に示すように、駆動層 5 1から可動磁性層 5 2に対する駆動作用 A 1が働かなくなったときに、可動磁性層 5 2の磁化が反転し、可動磁性層 5 2の磁化方向 M 1が、反強磁性層 5 3からの駆動作用 A 2の方向に揃うこととなる。すなわち、図 1 5 の例では、ON状態となったときに、可動磁性層 5 2の磁化方向 M 1が左向きとなるように反転する。

【0131】その後、駆動層 5 1を構成する導電体層への電流供給を止めて、駆動層 5 1から可動磁性層 5 2に対して駆動作用 A 1が働くようにしても、リセット状態のときと同様に、駆動層 5 1からの駆動作用 A 1は、反強磁性層 5 3からの駆動作用 A 2によって相殺される。そして、可動磁性層 5 2は一軸磁気異方性を有しているので、反転した可動磁性層 5 2の磁化方向 M 1は、図 1 5 (c) に示すように、そのまま保持される。すなわち、駆動層 5 1を構成する導電体層への電流供給を止め、駆動層 5 1から可動磁性層 5 2に対して駆動作用 A 1が働いている状態においても、図 1 5 (c) に示すように、可動磁性層 5 2の磁化方向 M 1を反転させたセット状態は保持される。

【0132】以上のように、この情報記録素子 5 0では、駆動層 5 1を構成する導電体層 5 2への電流供給の ON/OFF を切り換えることにより、可動磁性層 5 2の磁化方向 M 1を反転させることが可能となっており、可動磁性層 5 2の磁化の向きにより、二値の記録を行うことが可能となっている。しかも、この情報記録素子 5 0は、リセット状態やセット状態を保持するために、駆動層 5 1を構成する導電体層へ電流を供給する必要がない。すなわち、この情報記録素子 5 0は、不揮発性メモリとなっている。

【0133】なお、本発明者は、以上のような情報記録

素子 5 0として、図 4 及び図 5 に示した磁気機能素子 1 0と同様に、コバルト・フェライト薄膜からなり + x 方向に着磁された固定磁性層と、Cr 膜と Fe-Ag 膜とを繰り返し積層した多層膜からなる導電体層と、酸化アルミニウムからなる絶縁層と、x 軸方向に磁化容易軸をもつ Ni-Fe 合金薄膜からなる可動磁性層とを、ガラス基板上に形成し、更に、可動磁性層の上に、当該可動磁性層に対して - x 方向の駆動作用を働かせる Rh-Mn 膜からなる反強磁性層を形成した素子を実際に作製した。

【0134】そして、導電体層への電流供給の ON/OFF を切り換えたときの可動磁性層の磁化方向の変化を、磁気光学的カー効果を測定することにより調べた。具体的には、まず、導電体層に電流を供給していない状態で、+ x 方向に磁界を印加し、可動磁性層の磁化を + x 方向に揃えた。その後、印加磁界を取り去ったところ、可動磁性層の磁化は + x 方向に保持されていたが、導電体層に電流を供給すると、- x 方向への磁化反転が観測された。

【0135】このように、導電体層への電流供給の ON/OFF を切り換えることにより、可動磁性層の磁化方向を変化させることができ、一回書き込みを行うことができることが確認された。ただし、ここでの可動磁性層の磁化方向のスイッチ動作は、図 9 に示したような、可動磁性層の磁化方向と x 方向との成す角が約 20° から約 85° の間で変化するスイッチ動作ではなく、+ x 方向から - x 方向へのスイッチ動作であった。

【0136】また、導電体層への電流供給の ON/OFF を切り換えることにより、可動磁性層の磁化を一旦反転させると、当該反転状態は電流供給を止めても保持された。すなわち、可動磁性層の上に反強磁性層を形成した素子が、不揮発性メモリとして動作することも確認された。

【0137】2-3 書き換え可能型情報記録素子

電流による交換相互作用の変調を利用した、書き換え可能型の情報記録素子の一例を図 1 6 に示す。なお、図 1 6 は、図 1 4 及び図 1 5 と同様に、情報記録素子の駆動原理を説明するための模式図であり、出力回路や入力回路の配線等については省略している。

【0138】この情報記録素子 6 0は、図 1 6 に示すように、一軸磁気異方性を有する可動磁性層 6 1が、第 1 の駆動層 6 2と第 2 の駆動層 6 3 とに挟持された構造とされており、可動磁性層 6 1の磁化の向きにより、二値の記録を行うことが可能となっている。

【0139】なお、図 1 6 において、矢印 A 1 は、第 1 の駆動層 6 2 から可動磁性層 6 1 に対して働く駆動作用を示しており、矢印 A 2 は、第 2 の駆動層 6 3 から可動磁性層 6 1 に対して働く駆動作用を示しており、矢印 M 1 は、可動磁性層 6 1 の磁化方向を示している。

【0140】そして、可動磁性層 6 1 の磁化容易軸に沿

った方向を x 方向としたとき、第 1 の駆動層 6 2 は、可動磁性層 6 1 の磁化方向 $M1$ を $+x$ 方向（図 1 6 における右向き方向）に向かせるように、可動磁性層 6 1 に対して駆動作用 $A1$ を働かせる。一方、第 2 の駆動層 6 3 は、可動磁性層 6 1 の磁化方向 $M1$ を $-x$ 方向（図 1 6 における左向き方向）に向かせるように、可動磁性層 6 1 に対して駆動作用 $A2$ を働かせる。

【0141】この情報記録素子 6 0 において、第 1 の駆動層 6 2 から可動磁性層 6 1 への駆動作用 $A1$ を働かなくすると、第 2 の駆動層 6 3 から可動磁性層 6 1 への駆動作用 $A2$ により、可動磁性層 6 1 の磁化方向 $M1$ は、 $-x$ 方向を向くこととなる。一方、第 2 の駆動層 6 3 から可動磁性層 6 1 への駆動作用 $A2$ を働かなくすると、第 1 の駆動層 6 2 から可動磁性層 6 1 への駆動作用 $A1$ により、可動磁性層 6 1 の磁化方向 $M1$ は、 $+x$ 方向を向くこととなる。

【0142】また、この情報記録素子 6 0 において、第 1 の駆動層 6 2 から可動磁性層 6 1 への駆動作用 $A1$ と、第 2 の駆動層 6 3 から可動磁性層 6 1 への駆動作用 $A2$ との両方が働いている場合は、第 1 の駆動層 6 2 からの駆動作用 $A1$ と、第 2 の駆動層 6 3 からの駆動作用 $A2$ とが相殺し、可動磁性層 6 1 の磁化方向 $M1$ は、可動磁性層自身の一軸磁気異方性によって安定化されて、それまでの状態がそのまま保持される。

【0143】以下、この情報記録素子 6 0 の駆動原理について、更に詳細に説明する。

【0144】図 1 6 (a) に、可動磁性層 6 1 の磁化方向 $M1$ が $+x$ 方向（図中右方向）に保たれている状態を示す。このとき、第 1 の駆動層 6 2 を構成する導電体層への電流供給、及び第 2 の駆動層 6 3 を構成する導電体層への電流供給は行わない。したがって、可動磁性層 6 1 には、第 1 の駆動層 6 2 からの駆動作用 $A1$ と、第 2 の駆動層 6 3 からの駆動作用 $A2$ との両方が働く。しかし、第 1 の駆動層 6 2 からの駆動作用 $A1$ の方向と、第 2 の駆動層 6 3 からの駆動作用 $A2$ の方向とは互いに逆向きであるので、第 1 の駆動層 6 2 からの駆動作用 $A1$ と、第 2 の駆動層 6 3 からの駆動作用 $A2$ とは相殺する。そのため、可動磁性層 6 1 の磁化方向 $M1$ は、可動磁性層自身の一軸磁気異方性によって安定化されて、それまでの状態（ここでは、可動磁性層 6 1 の磁化方向 $M1$ が $+x$ 方向を向いている状態）がそのまま保持される。

【0145】つぎに、図 1 6 (b) に、可動磁性層 6 1 の磁化方向 $M1$ を $+x$ 方向（図中右方向）から $-x$ 方向（図中左方向）に書き換えるときの状態を示す。このときは、第 1 の駆動層 6 2 を構成する導電体層に電流を供給する。これにより、第 1 の駆動層 6 2 から可動磁性層 6 1 への駆動作用 $A1$ が働かなくなる。一方、第 2 の駆動層 6 3 を構成する導電体層への電流供給は行わない。したがって、可動磁性層 6 1 には、第 2 の駆動層 6 3 か

らの駆動作用 $A2$ が働く。

【0146】このとき、第 2 の駆動層 6 3 から可動磁性層 6 1 に対して働く駆動作用 $A2$ が、可動磁性層 6 1 の保磁力を超える大きさをもつようにしておく。第 2 の駆動層 6 3 からの駆動作用 $A2$ が可動磁性層 6 1 の保磁力を超えるようになされていれば、図 1 6 (b) に示すように、第 1 の駆動層 6 2 からの駆動作用 $A1$ が働かなくなったときに、可動磁性層 6 1 の磁化が $+x$ 方向（図中右方向）から $-x$ 方向（図中左方向）に反転し、可動磁性層 6 1 の磁化方向 $M1$ が、第 2 の駆動層 6 3 からの駆動作用 $A2$ の方向に揃うこととなる。

【0147】つぎに、図 1 6 (c) に、可動磁性層 6 1 の磁化方向 $M1$ が $-x$ 方向（図中右方向）に保たれている状態を示す。このとき、第 1 の駆動層 6 2 を構成する導電体層への電流供給、及び第 2 の駆動層 6 3 を構成する導電体層への電流供給は行わない。したがって、可動磁性層 6 1 には、第 1 の駆動層 6 2 からの駆動作用 $A1$ と、第 2 の駆動層 6 3 からの駆動作用 $A2$ との両方が働く。しかし、第 1 の駆動層 6 2 からの駆動作用 $A1$ の方向と、第 2 の駆動層 6 3 からの駆動作用 $A2$ の方向とは互いに逆向きであるので、第 1 の駆動層 6 2 からの駆動作用 $A1$ と、第 2 の駆動層 6 3 からの駆動作用 $A2$ とは相殺する。そのため、可動磁性層 6 1 の磁化方向 $M1$ は、可動磁性層自身の一軸磁気異方性によって安定化されて、それまでの状態（ここでは、可動磁性層 6 1 の磁化方向 $M1$ が $-x$ 方向を向いている状態）がそのまま保持される。

【0148】つぎに、図 1 6 (d) に、可動磁性層 6 1 の磁化方向 $M1$ を $-x$ 方向（図中左方向）から $+x$ 方向（図中右方向）に書き換えるときの状態を示す。このときは、第 2 の駆動層 6 3 を構成する導電体層に電流を供給する。これにより、第 2 の駆動層 6 3 から可動磁性層 6 1 への駆動作用 $A2$ が働かなくなる。一方、第 1 の駆動層 6 2 を構成する導電体層への電流供給は行わない。したがって、可動磁性層 6 1 には、第 1 の駆動層 6 2 からの駆動作用 $A1$ が働く。

【0149】このとき、第 1 の駆動層 6 2 から可動磁性層 6 1 に対して働く駆動作用 $A1$ が、可動磁性層 6 1 の保磁力を超える大きさをもつようにしておく。第 1 の駆動層 6 2 からの駆動作用 $A1$ が可動磁性層 6 1 の保磁力を超えるようになされていれば、図 1 6 (d) に示すように、第 2 の駆動層 6 3 からの駆動作用 $A2$ が働かなくなったときに、可動磁性層 6 1 の磁化が $-x$ 方向（図中左方向）から $+x$ 方向（図中右方向）に反転し、可動磁性層 6 1 の磁化方向 $M1$ が、第 1 の駆動層 6 2 からの駆動作用 $A1$ の方向に揃うこととなる。

【0150】以上のように、この情報記録素子 6 0 では、第 1 の駆動層 6 2 を構成する導電体層への電流供給の ON/OFF や、第 2 の駆動層 6 3 を構成する導電体層への電流供給の ON/OFF を切り換えることによ

り、可動磁性層 6 1 の磁化方向 M 1 を反転させることが可能となっており、可動磁性層 6 1 の磁化の向きにより、二値の記録を行うことが可能となっている。しかも、この情報記録素子 6 0 では、可動磁性層 6 1 の磁化方向 M 1 を繰り返し反転させることが可能であり、記録した情報の書き換えを繰り返し行うことが可能となっている。さらに、この情報記録素子 6 0 は、可動磁性層 6 1 の磁化方向 M 1 を保持するために、第 1 の駆動層 6 2 を構成する導電体層や、第 2 駆動層 6 3 を構成する導電体層へ電流を供給する必要がない。すなわち、この情報記録素子 6 0 は、不揮発性メモリとなっている。

【0151】ところで、以上の説明で挙げた情報記録素子 4 0, 5 0, 6 0 では、可動磁性層 4 2, 5 2, 6 1 として一軸磁気異方性を有するものを使用して、二値記録を行えるようにしていた。しかし、これらの可動磁性層 4 2, 5 2, 6 1 には、磁化の向きに対する異方性エネルギーの極小点が 3 つ以上存在するようなものを使用するようにしても良い。可動磁性層 4 2, 5 2, 6 1 として、磁化の向きに対する異方性エネルギーの極小点が 3 つ以上存在するようなものを使用するようにした場合

【0152】2-4 可変抵抗素子

電流による交換相互作用の変調を利用した、可変抵抗素子の一例を図 1 7 に示す。

【0153】図 1 7 に示す可変抵抗素子 8 0 は、図 1 3 に示した素子（可動磁性層の磁化方向のスイッチ動作の結果を電氣的出力として得るようにした素子）と同様に構成されている。すなわち、この可変抵抗素子 8 0 は、図 1 7 に示すように、磁化方向 M a が一定の方向を向くように固定された第 1 の固定磁性層 8 1 と、固定磁性層 8 1 の上に形成された導電体層 8 2 と、導電体層 8 2 の上に形成された可動磁性層 8 3 と、可動磁性層 8 3 の上に形成された非磁性金属からなるスペーサー層 8 4 と、磁化方向 M b が一定の方向を向くように固定された磁性金属からなる第 2 の固定磁性層 8 5 とを備えている。

【0154】この可変抵抗素子 8 0 では、導電体層 8 2 に電流を流すことで、第 1 の固定磁性層 8 1 と可動磁性層 8 3 との間の磁氣的結合状態を変化させて、可動磁性層 8 3 の磁化方向 M c を制御する。ここで、導電体層 8 2 には、入力電流値に対する第 1 の固定磁性層 7 1 と可動磁性層 8 3 との間の磁氣的結合状態の変化の度合いが、比較的緩やかな材料を用いたほうが好ましい。磁氣的結合状態の変化の度合いが比較的緩やかな材料を用いることにより、導電体層 8 2 への電流入力によって可動磁性層 8 3 の磁化方向 M c を、ほぼ無段階に変化させることが可能となる。

【0155】なお、入力電流値に対する磁氣的結合状態の変化の度合いを比較的緩やかなものとするには、具体的には例えば、導電体層 1 3 に、強磁性組成の領域と

非磁性組成の領域とが 3 次的に混じり合った構造のものを用いれば良い。上述したように、強磁性組成の領域と非磁性組成の領域とが 3 次的に混じり合った構造のものでは、強さの異なる磁気結合の経路が多数存在するので、弱い結合から順に切っていくようにすれば、磁気結合を漸減させることが可能である。したがって、導電体層 8 2 への電流入力によって可動磁性層 8 3 の磁化方向 M c を、ほぼ無段階に変化させて、アナログ的に動作させることが可能となる。

10 【0156】また、この可変抵抗素子 8 0 では、可動磁性層 8 3、スペーサー層 8 4 及び第 2 の固定磁性層 8 5 によってスピバルブが構成されており、可動磁性層 8 3 の磁化方向 M c が変化すると、可動磁性層 8 3、スペーサー層 8 4 及び第 2 の固定磁性層 8 5 のスピバルブ動作によって、可動磁性層 8 3、スペーサー層 8 4 及び第 2 の固定磁性層 8 5 に至る経路の電気抵抗が変化する。

20 【0157】すなわち、この可変抵抗素子 8 0 では、導電体層 8 2 に電流を流すことで、第 1 の固定磁性層 8 1 と可動磁性層 8 3 との間の磁氣的結合状態を変化させて、可動磁性層 8 3 の磁化方向 M c を制御することが可能となっており、このように可動磁性層 8 3 の磁化方向 M c を制御することにより、可動磁性層 8 3、スペーサー層 8 4 及び第 2 の固定磁性層 8 5 に至る経路の電気抵抗を制御することが可能となっている。

30 【0158】この可変抵抗素子 8 0 は、例えば、図 1 7 に示すような回路構成とし、可動磁性層 8 3、スペーサー層 8 4 及び第 2 の固定磁性層 8 5 によって構成されるスピバルブを適切な動作点をもつように設定することで、アナログ増幅器として使用することもできる。すなわち、図 1 7 に示すような回路構成とすることにより、導電体層 8 2 への小さな電流入力で、出力側の大電流回路のインピーダンスを変化させる増幅動作が可能になる。

【0159】

40 【発明の効果】以上詳細に説明したように、本発明に係る磁化制御方法及び情報記録方法では、磁性層間の磁氣的結合状態を変化させることで磁性層の磁化方向を制御するようにしているので、磁性層の磁化方向を制御するにあたって、微細化に伴うクロストークの発生や保磁力の低下といった問題を回避することができる。そして、そのような磁化制御方法を利用した本発明に係る磁気機能素子、情報記録素子及び可変抵抗素子は、微細化を進めても、クロストークの発生や保磁力の低下といった問題を回避することができる。したがって、本発明によれば、更なる高集積化を図った磁気メモリ等を実現するようなことが可能となる。

【図面の簡単な説明】

50 【図 1】磁性体 A と磁性体 B とが接触している構造を示す図である。

【図 2】磁性体 A と磁性体 B との間に中間層 C が存在している構造を示す図である。

【図 3】情報記録素子のセル寸法 L と、記録担体の駆動に用いることができる駆動磁界 H との関係を示す図である。

【図 4】本発明を適用した磁気機能素子の一例を示す平面図である。

【図 5】本発明を適用した磁気機能素子の一例を示す図であり、図 4 の X 1 - X 2 線における断面図である。

【図 6】直交する 2 方向 (x 方向, y 方向) の磁化成分 10 の測定方法を示す図である。

【図 7】磁気機能素子の直交する 2 方向 (x 方向, y 方向) の磁化履歴の測定結果を示す図である。

【図 8】非磁性基板上に形成された Ni - Fe 合金薄膜の磁化曲線を示す図である。

【図 9】磁気機能素子の可動磁性層の磁化方向を示す図であり、導電体層に電流を供給した通電状態のときの磁化方向と、導電体層に電流を供給していない状態のときの磁化方向とを示す図である。

【図 10】導電体層に供給する電流の ON/OFF を切り換えたときの、磁気機能素子の直交する 2 方向 (x 方向, y 方向) の磁化の時間変化を観測した結果を示す図である。

【図 11】積層構造の導電体層の構造を模式的に示す図である。

【図 12】微粒子分散構造の導電体層の構造を模式的に示す図である。

【図 13】可動磁性層の磁化方向のスイッチ動作の結果

を電気的出力として得るようにしたときの、磁気機能素子及びその周辺回路の構成を示す図である。

【図 14】1 回書き込み可能型情報記録素子であって負論理駆動型の素子について、その駆動原理を説明するための模式図であり、図 14 (a) はリセット状態を示す図、図 14 (b) は ON 状態を示す図、図 14 (c) はセット状態を示す図である。

【図 15】1 回書き込み可能型情報記録素子であって正論理駆動型の素子について、その駆動原理を説明するための模式図であり、図 15 (a) はリセット状態を示す図、図 15 (b) は ON 状態を示す図、図 15 (c) はセット状態を示す図である。

【図 16】書き換え可能型情報記録素子について、その駆動原理を説明するための模式図であり、図 16 (a) は可動磁性層の磁化方向が右向きに保持されている状態を示す図、図 16 (b) は可動磁性層の磁化方向を左向きに書き換えるときの状態を示す図、図 16 (c) は可動磁性層の磁化方向が左向きに保持されている状態を示す図、図 16 (d) は可動磁性層の磁化方向を右向きに書き換えるときの状態を示す図である。

【図 17】本発明を適用した可変抵抗素子の一例を示す図である。

【図 18】スピントランジスタの構成を示す図である。

【符号の説明】

10 磁気機能素子、 11 ガラス基板、 12 固定磁性層、 13 導電体層、 14, 15 電極、 16 絶縁層、 17 可動磁性層

【図 1】



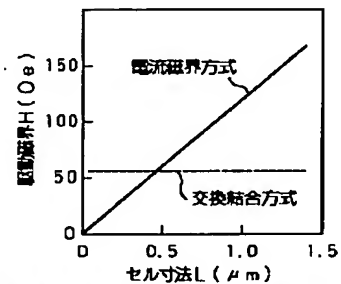
磁性体 A と磁性体 B とが接触している構造

【図 2】



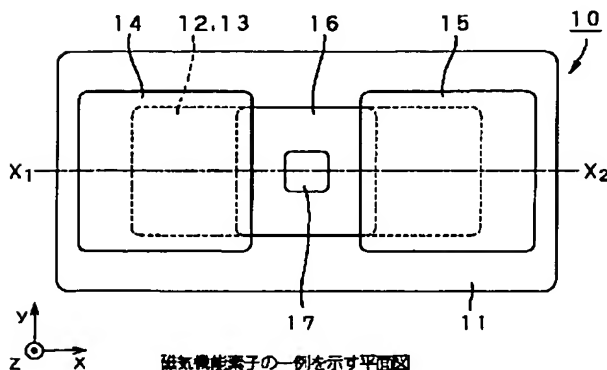
磁性体 A と磁性体 B との間に中間層 C が存在している構造

【図 3】



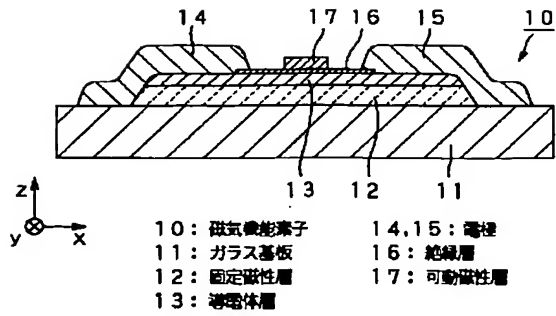
情報記録素子のセル寸法 L と、駆動磁界 H との関係

【図 4】

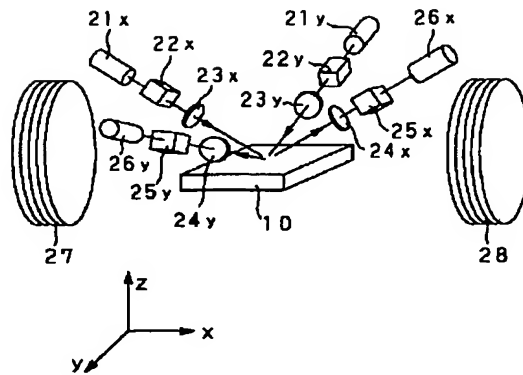


磁気機能素子の一例を示す平面図

【図 5】

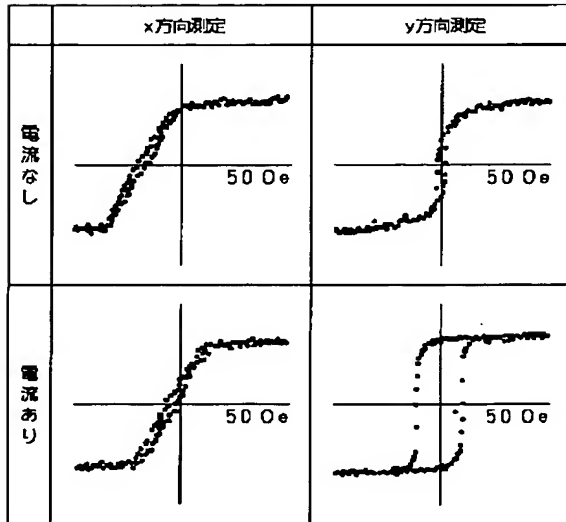
図4のX₁-X₂線における断面図

【図 6】



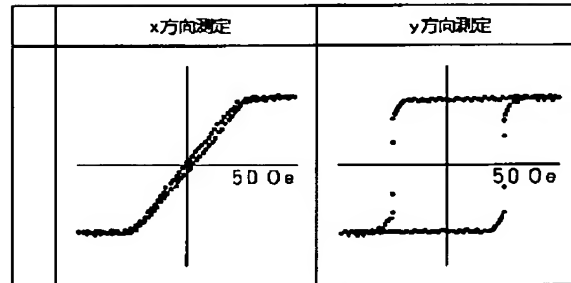
直交する2方向(X, Y)の磁化成分測定法

【図 7】



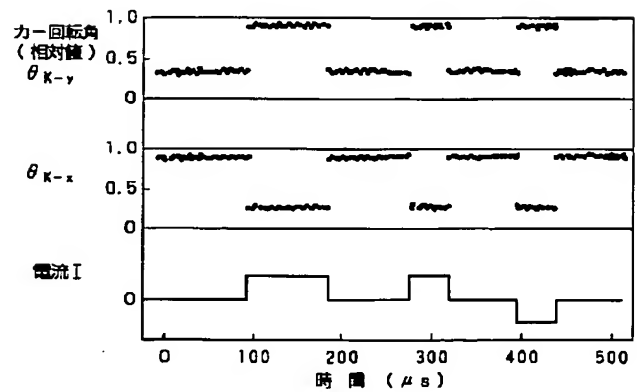
磁気機能素子の直交する2方向(x, y)の磁化履歴測定結果

【図 8】



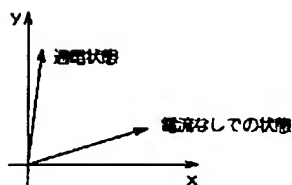
非磁性基板上に形成されたNi-Fe合金薄膜の磁化曲線(比較用)

【図 10】



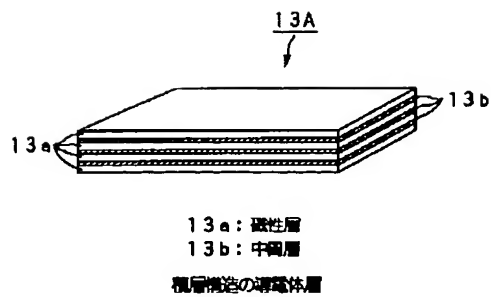
磁気機能素子の直交する2方向(x, y)の磁化の時間変化

【図 9】

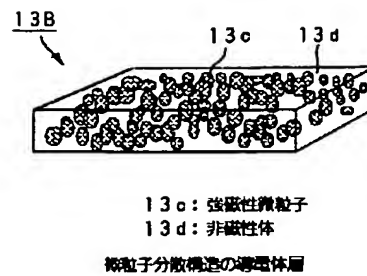


磁気機能素子の可動磁性層の磁化方向

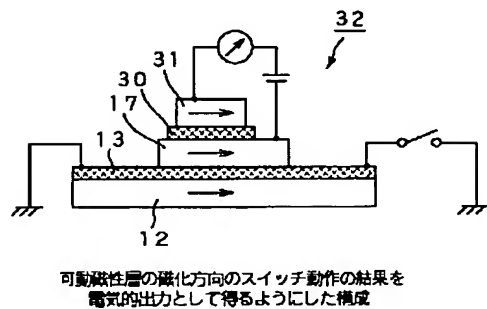
【図 1 1】



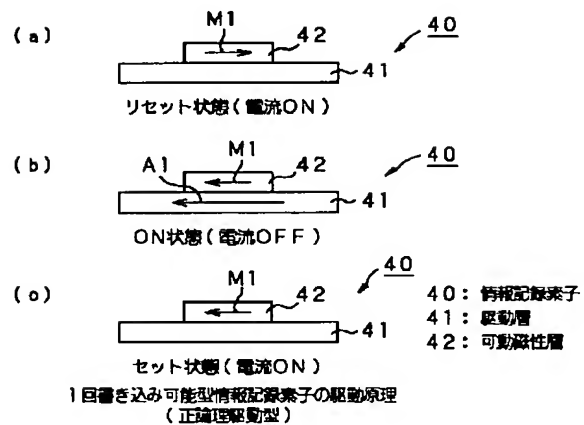
【図 1 2】



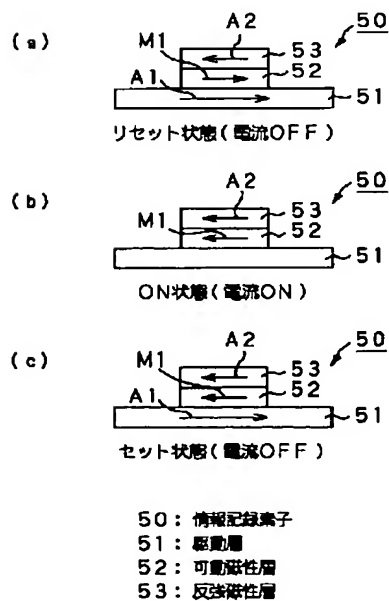
【図 1 3】



【図 1 4】

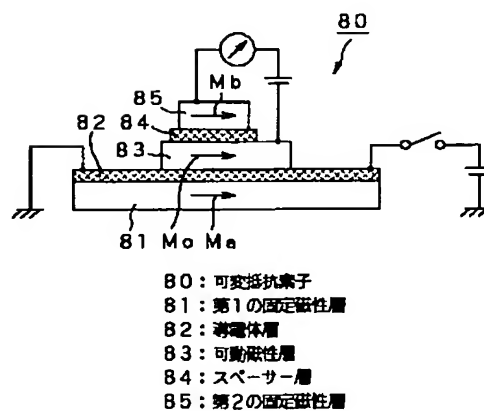


【図 1 5】



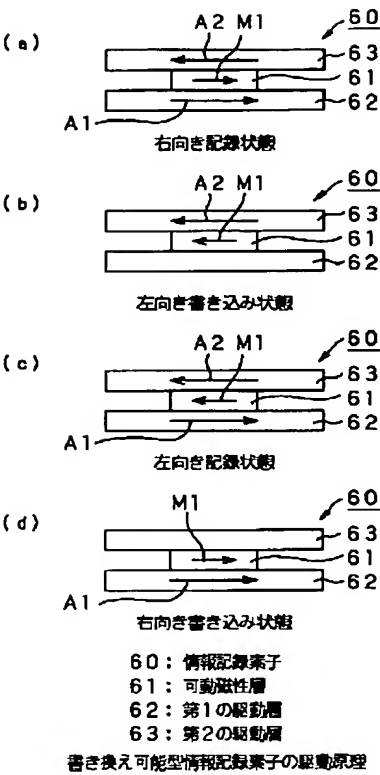
1 回書き込み可能型情報記録素子の駆動原理
(負論理駆動型)

【図 1 7】



可変抵抗素子の一例

【図 1 6】



【図 1 8】

